

Sensorgestützte Anomalie-Detektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen

Die Erfassung und automatische Bewertung von georeferenzierten, im regulären Betrieb fahrzeugseitig gemessenen Achslagerbeschleunigungen ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Gleisauffälligkeiten. Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) wird dazu an der gleisgenauen Positionierung von Schienenfahrzeugen sowie der Bearbeitung und Analyse von Beschleunigungsdaten geforscht.

EINLEITUNG

Die Infrastrukturanlagen des Schienenverkehrs in Europa unterliegen einem umfassenden Instandhaltungsprogramm, das dafür Sorge tragen soll, dass der Schienenfahrweg sicher, zuverlässig sowie wirtschaftlich betrieben werden kann. Für den Gleisoberbau werden hierfür etwa 50 % der gesamten Lebenszykluskosten aufgewendet [1]. Ein großes Kosteneinsparpotenzial wird in der Einführung von zustandsbasierter bzw. prädiktiver Wartung und Instandsetzung gesehen. Um diese Instandhaltungsstrategien verfolgen zu können, ist eine quasi-kontinuierliche, flächendeckende Erfassung von Zustandsdaten notwendig, die über die derzeitigen Inspektionsmaßnahmen mit dezidierten Messzügen und Streckenbegehungen weit hinausgeht.

Neue Technologien zur sensorgestützten Zustandserfassung spielen dabei eine wichtige Rolle. Streckenseitig ist hier insbesondere die Verwendung von Glasfasertechnologien [2] zu nennen, die jedoch noch relativ am Anfang der Entwicklung stehen. Ein alternativer bzw. komplementärer und schon länger untersuchter Ansatz basiert auf der Verwendung von eingebetteten Sensorsystemen auf regulären Schienenfahrzeugen [3, 4]. Insbesondere Inertialsensoren zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen (Beschleunigungssensoren an Achslagern oder Drehgestell) stehen hierbei im Fokus. Derartige neue Technologien werden zukünftig sehr große Datenmengen erzeugen. Deren Übertragung, Speicherung, Bearbeitung und Analyse stellen die großen Herausforderungen der nächsten Jahre dar. Um die fahrzeugseitigen Sensorsysteme möglichst au-



Dr. Benjamin Baasch
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für
Verkehrssystemtechnik, Berlin
benjamin.baasch@dlr.de



Dr. Jörn Christoffer Groos
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für
Verkehrssystemtechnik,
Braunschweig
joern.groos@dlr.de



Dr. Michael Roth
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für
Verkehrssystemtechnik,
Braunschweig
m.roth@dlr.de



BILD 1:
Schienennetz der Braunschweiger Hafenbahn (magenta) mit Position der Rangierlokomotive (grün)
(Quelle: DLR/ Hintergrundbild aus [12])

tark betreiben zu können, gelten besondere Anforderungen an deren Robustheit, Zuverlässigkeit und Energieverbrauch. Soll z. B. ein Sensorsystem über mehrere Jahre mit Hilfe einer Batterie betrieben werden, limitiert dies die Aufzeichnungs- und Übertragungsrate der Daten, die vom Fahrzeug an ein zentrales Datenmanagement-System gesendet werden. Hierbei einen geeigneten Kompromiss zwischen Abtastezeit, Verarbeitungsaufwand, Übertragungsrate der Daten und Energieverbrauch der Multi-Sensor-Systeme zu finden ist deshalb weiterer Gegenstand aktueller Forschung. Um das Ziel zu erreichen, möglichst komplette Fahrzeugflotten im Zuge von Digitalisierungsmaßnahmen mit solchen Multi-Sensor-Systemen auszustatten, müssen möglichst kostengünstige Sensoren verwendet werden.

ERFASSUNG VON GEOREFERENZIERTEN ACHSLAGERBESCHLEUNIGUNGEN

Das DLR nutzt eigene Multi-Sensor-Systeme zur Datenerfassung auf regulär verkehrenden Schienenfahrzeugen [5]. Diese basieren auf handelsüblichen kostengünstigen Hardwarekomponenten (Components-of-the-shelf/COTS). Die Verwendung von kostengünstigen Sensoren soll die Systeme attraktiv für eine möglichst umfassende Aus- bzw. Nachrüstung von Fahrzeugflotten machen.

Zur Erprobung der Zustandsüberwachung im regulären Betrieb kooperiert das DLR unter anderem mit der Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig. Auf deren Gleisnetz im Braunschweiger Binnenhafen hat das DLR zwei Rangierlokomotiven mit Sensor-Systemen ausgestattet. Seit 2015 werden auf diesem Gleisnetz von über 15 km Länge kontinuierlich Daten aufgezeichnet (Bild 1). Die Systeme, die dort im Einsatz sind, benutzen zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen breitbandige (8 Hz–8000 Hz) drei-axiale Achslager-Beschleunigungssensoren. Die Multi-Sensor-Systeme verfügen außerdem über einen Satellitennavigationsempfänger (Global Navigation Satellite Systems – GNSS) und eine Inertialmesseinheit (Intertial Measurement Unit – IMU) zur Erfassung von Beschleunigung und Drehraten. Die Daten von GNSS und IMU werden zusammen mit einer hochgenauen digitalen Karte der Gleisinfrastruktur zur gleisgenauen Georeferenzierung verwendet [6]. Die Kombination verschiedener Sensoren ist notwendig, um Ungenauigkeiten durch Abschattungen und Reflektionen der Satellitensignale auszugleichen. Der Einsatz von kostengünstigen Sensoren bringt weitere Herausforde-

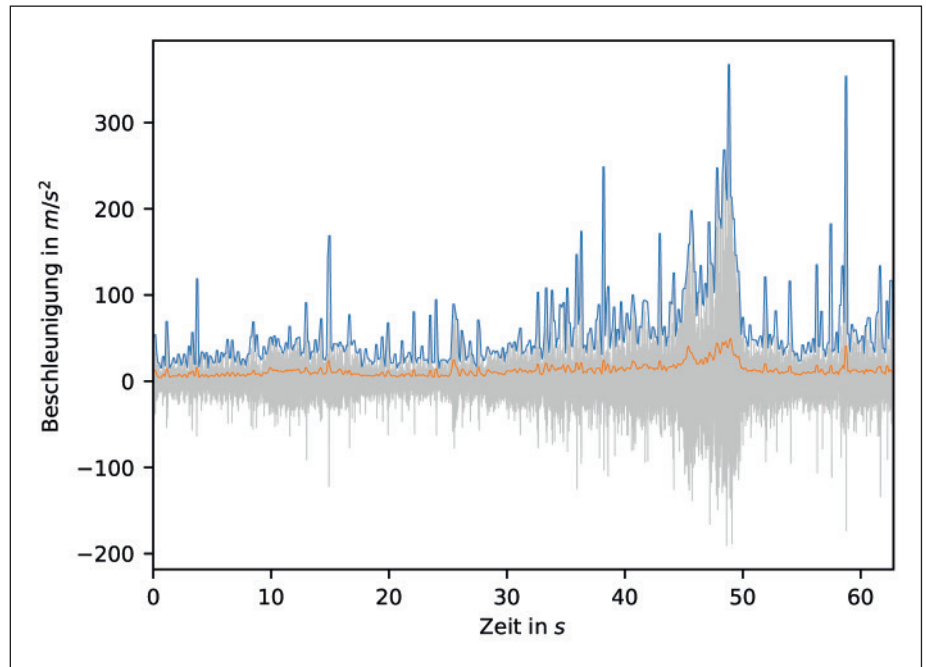


BILD 2: Achslagerbeschleunigungen (grau) von einem etwa einminütigen Fahrtabschnitt mit RMS-Wert (orange) und Maximalamplitude (blau)

rungen mit sich. So liegt die Abtastezeit des verwendeten GNSS-Empfängers bei 5 Hz, was die erreichbare Positionsauflösung limitiert. Inertialmesseinheiten hingegen weisen zwar hohe Abtastraten auf, günstige Modelle leiden aber an höherer Messungenauigkeit als teurere Inertialsensoren. Diese Einschränkungen können durch intelligente und robuste Verarbeitung mit Datenfusionsalgorithmen überwunden werden. Dazu gehört neben der Kombination von GNSS und IMU insbesondere auch die weniger

etablierte Einbindung von Schienenkarten [6]. Die gleisgenaue Georeferenzierung erfolgt dabei nicht in Echtzeit, sondern durch Offline-Verfahren (Rauch-Tung-Striebel/RTS-Smoother [7]), welche die Ergebnisse von Kalman-Filtern weiterverarbeiten und so die Genauigkeit steigern. Die Karte dient dazu, die Position des Fahrzeuges auf mögliche Positionen auf dem Gleis zu beschränken. Somit werden nicht nur die geographischen Koordinaten ermittelt, sondern auch die Position im Gleisnetz (Strecke und Streckenki-

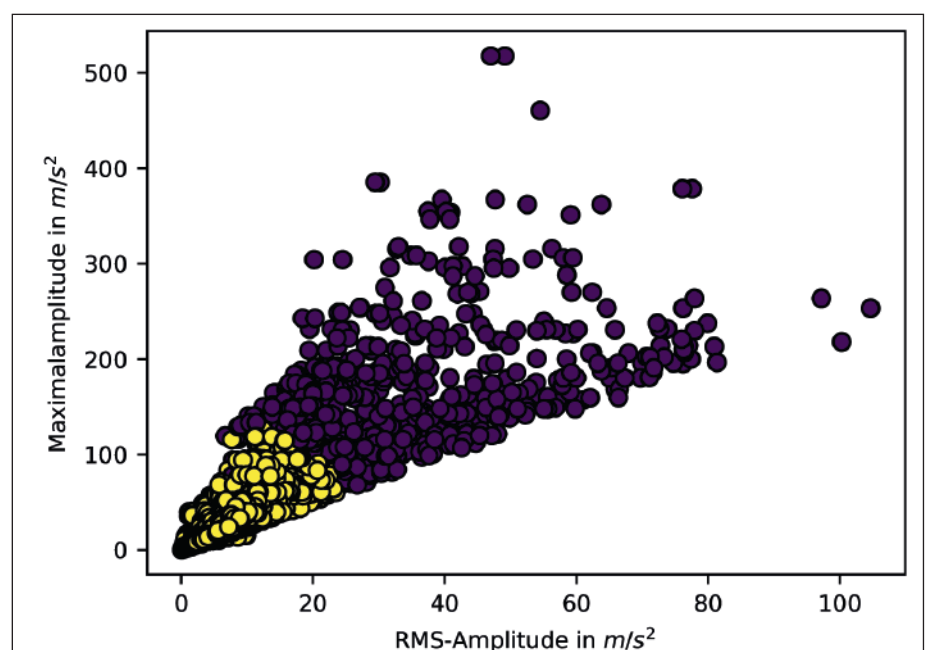


BILD 3: Extrahierte Merkmale Maximalamplitude und RMS-Amplitude gegeneinander dargestellt, detektierte Anomalien sind in dunkelviolett und normale Werte in gelb dargestellt

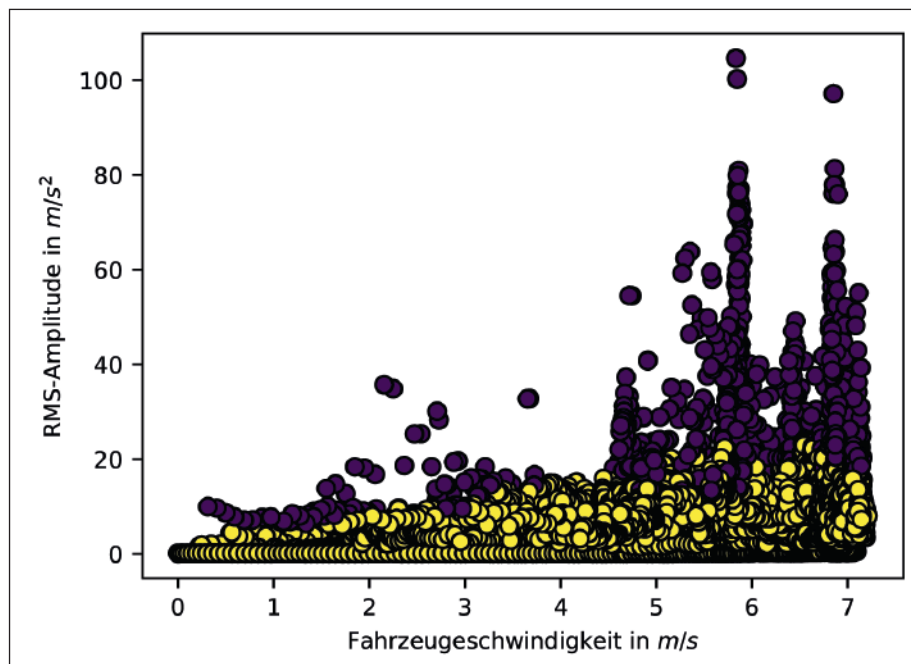


BILD 4: Extrahiertes Merkmal RMS-Amplitude in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt; detektierte Anomalien sind in dunkelviolett und normale Werte in gelb dargestellt

lometer) und die Fahrzeuggeschwindigkeit entlang der Strecke bestimmt. Außerdem werden alle Sensoren bei der Aufzeichnung durch die GNSS-Zeit synchronisiert.

DATENANALYSE UND ANOMALIE-DETEKTION

Die Analyse von Vibrationsdaten ist in der industriellen Praxis ein häufig eingesetztes

Verfahren zur Überwachung von Maschinen und Anlagen. Auch die Überwachung des Streckenzustandes mittels der von fahrzeuggebundenen Beschleunigungssensoren an den Achslagern erfassten Vibrationen wird seit längerem weltweit erforscht. Das übergeordnete Ziel besteht darin, Fehlstellen zu erkennen (Detektion), zu klassifizieren (Diagnose) und wenn möglich zu quantifizieren (z.B. Tiefe und Ausdehnung von Schienenschäden in mm). Es hat sich aber

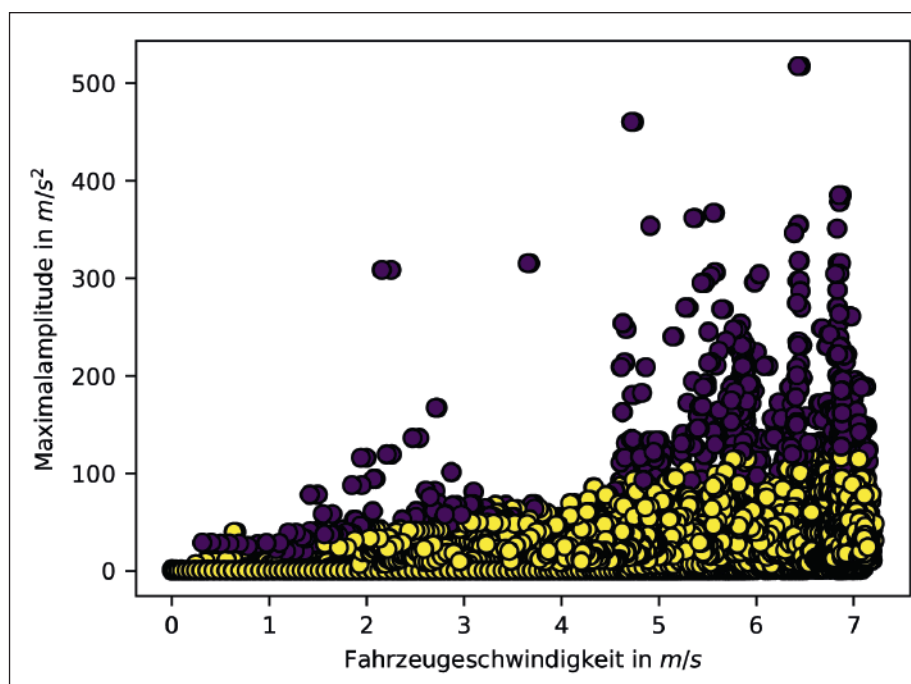


BILD 5: Extrahiertes Merkmal Maximalamplitude in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt; detektierte Anomalien sind in dunkelviolett und normale Werte in gelb dargestellt

gezeigt, dass zum Erreichen dieser Ziele etliche Herausforderungen bewältigt werden müssen. Zum einen ist die Wechselwirkung von Schiene und Rad an sich hoch komplex und Veränderungen im Signal lassen sich nicht ohne weiteres eindeutig Veränderungen des Schienenzustandes zuordnen. Vielmehr haben die Art und der Zustand des gesamten Gleisoberbaus sowie bestimmter Fahrzeugkomponenten (z.B. Rad, Federung) einen maßgeblichen Einfluss auf die gemessenen Vibrationen. Zum anderen wirken andere variable äußere Einflussfaktoren wie die Fahrzeugbeladung und vor allem die Fahrzeuggeschwindigkeit mitunter stark auf die fahrdynamischen Reaktionen ein.

Ein solches System mit einem physikalischen Modell hinreichend genau zu beschreiben, erweist sich als äußerst kompliziert und ist oft sogar unmöglich, da notwendige Parameter für das betrachtete Fahrzeug schlichtweg nicht bekannt sind und sich zudem mit der Zeit ändern. Eine Alternative bieten rein datengetriebene Verfahren. Hierbei können überwachte Lernmethoden genutzt werden, um anhand von Referenzdaten bestimmte Muster zu erlernen und wiederzuerkennen. Sind solche Referenzdaten nicht vorhanden, bieten unüberwachte Lernmethoden die Möglichkeit, Ausreißer zu erkennen und durch Cluster-Analysen zu beschreiben. Das DLR forscht darüber hinaus auch an hybriden Ansätzen, die modellbasierte und datengetriebene Algorithmen verbinden [8]. Solche detaillierten Analysen können oft sehr rechenintensiv sein, daher ist es wünschenswert, sie nur an ausgewählten, relevanten Stellen im Streckennetz durchzuführen. Solche Stellen können bzw. sollten daher idealerweise vorab mit Ansätzen der unüberwachten Anomalie-Detektion identifiziert werden. Im ersten Schritt werden dazu beschreibende Merkmale aus den Zeitreihen der erfassten Messdaten extrahiert (Bild 2). Anhand dieser Merkmale werden dann Anomalien erkannt. Hierbei haben sich insbesondere der Maximalwert und das quadratische Mittel (root mean square – RMS) über einem fortlaufenden zeitlichen Fenster als einfach zu bestimmende Zeitbereichs-Merkmale bewährt [9]. Derartige Merkmale, die im Zusammenhang mit der Signalamplitude stehen, sind jedoch stark von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten, wie z.B. beim Rangierbetrieb, lassen sich Anomalien schwieriger von den Normalwerten unterscheiden. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines einfachen Grenzwertes zur Erkennung von Ausreißern hier nicht zielführend. Stattdessen kommt in diesem Fall ein multivariater Anomalie-Detektions-Algorithmus, der die Geschwin-

digkeit explizit berücksichtigt, zum Einsatz. Als besonders effektiv hat sich hier der Isolation-Forest (IF)-Algorithmus [10] erwiesen, der auch bei sehr geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten ($< 2 \text{ m/s}$) zum Erfolg führt (Bilder 3–5). Ein weiterer Vorteil ist, dass der Algorithmus, wenn einmal trainiert, ohne erneute Kalibrierung auf neue unbekannte Daten angewendet werden kann. Das bedeutet, dass der Algorithmus offline an großen Datenmengen lernen kann, um dann online bereits fahrzeugseitig Anomalien zu detektieren. Dies ermöglicht eine selektive Datenspeicherung und -übertragung, die nur auffällige Datensegmente berücksichtigt. Außerdem kann die Information einer detektierten Anomalie zusammen mit den Positionsdaten und Statusmeldungen per Mobilfunkverbindung an das Hintergrundsystem [11] übertragen werden.

Im Nachgang können identifizierte Anomalien wiederum anhand der zugrundeliegenden Merkmale charakterisiert und einem Fehlertyp zugeordnet werden. Der IF-Algorithmus bestimmt außerdem die Stärke einer Anomalie (engl. anomaly score), die als Indiz für die Ausprägung eines Gleisfehlers dienen kann.

Bild 6 zeigt, wie die detektierten Anomalien anhand der extrahierten Merkmale bestimmten Arten von Gleis- bzw. Schienenfehlern zugeordnet werden können. Anomalien mit einem hohen RMS-Wert sind charakteristisch für räumlich ausgedehntere Fehlzustände, wie die in Bild 6 (links) dargestellte Verschmutzung im Bereich der Kohleverladung. Anomalien mit einer, im Verhältnis zum RMS-Wert, hohen Maximalamplitude weisen hingegen auf räumlich isolierte Fehlstellen, wie die Schweißstelle in Bild 6 (rechts), hin.

FAZIT UND AUSBLICK

Fahrzeuggetragene Sensoren werden in Zukunft große Datenmengen sammeln, die zur Zustandsüberwachung der Schieneninfrastruktur genutzt werden können. Diese quasi-kontinuierliche Datenerfassung erlaubt es, Fehlzustände des Gleisoberbaus frühzeitig zu erkennen und damit die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Schienenverkehrs zu erhöhen und Instandhaltungskosten zu senken. Die Entwicklung von Strategien zur Datenverarbeitung und -analyse ist dafür entscheidend. Das DLR erhebt zu diesem Zweck seit 2015 Daten bei der Braunschweiger Hafenbahn. Die Verwendung von kostengünstigen Sensoren ist dabei eine Grundvoraussetzung, um eine ökonomisch attraktive Lösung für Bahnbetreiber und Schienenlogistikunternehmen zu entwickeln. Eine rein

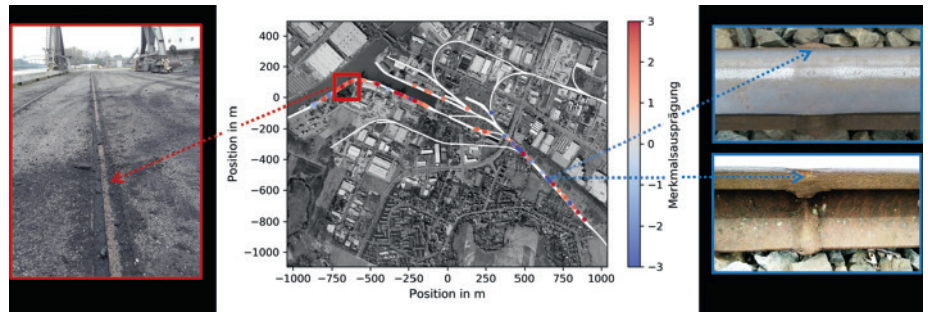


BILD 6: Auffällige Fahrzeugreaktionen, die mit Hilfe der Anomalie-Detektion erkannt wurden (Mitte). Blaue Punkte weisen auf räumlich isolierte Fehlstellen wie die Schweißstelle rechts im Bild hin. Rote Punkte zeigen räumlich ausgedehntere Gleisfehler an, wie sie z. B. im Bereich der Kohleverladung links im Bild auftreten. Die Farbintensität repräsentiert die Stärke einer Anomalie und ist somit ein Indikator für die Ausprägung eines Gleiszustandes

(Quelle: DLR/Hintergrundbild der mittleren Abbildung aus [13])

datengetriebene Anomalie-Detektion erlaubt es, relevante Gleisstellen automatisch zu erkennen, um diese dann gezielt weiter zu untersuchen und zu beobachten. Streckenbegehungen zur Inspektion der Schieneninfrastruktur können somit zielgerichteter durchgeführt werden. Die Datenanalyse sowie die gleisgenaue Positionierung von Schienenfahrzeugen werden am DLR in laufenden Forschungsprojekten kontinuierlich weiterentwickelt. ◀

Literatur

- [1] LICB ARBEITSGRUPPE: Kontinuierliches Benchmarking der Infrastrukturkosten (LICB): Synthesebericht Dezember 2008. 2008
- [2] S. J. BUGGY; S. W. JAMES; S. STAINES; R. CARROLL; P. KITSON; D. FARRINGTON; L. DREWETT; J. JAISWAL; R. P. TATAM: Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors. In: Measurement Science and Technology 27 (2016), Nr. 5, S. 055201. URL <http://stacks.iop.org/0957-0233/27/i=5/a=055201>
- [3] WOLTER, Klaus Ulrich; ERHARD, Franz; GABLER, Hans; HEMPE, Thomas: Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb: Kontinuierlich inspizieren – Instandsetzung gezielt planen – Qualität und Nachhaltigkeit prüfen. In: Eisenbahntechnische Rundschau (2014), 7+8, S. 32–36
- [4] GROOS, Jörn C.; JOHANNES, Lars; ADAM, Stephan: Zustandsüberwachung im regulären Betrieb. In: El – Eisenbahningenieur (2016), Nr. 9, S. 114–120. URL <http://elib.dlr.de/104953/>
- [5] GROOS, Jörn C.; ROTH, Michael; HAVRILA, Patrik: Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen. In: El – Eisenbahningenieur (2017), Nr. 10, S. 41–45
- [6] ROTH, Michael; BAASCH, Benjamin; HAVRILA, Patrik; GROOS, Jörn: Map-Supported Positioning Enables In-Service Condition Monitoring of Railway Tracks. In: 2018 International Conference on Information Fusion (FUSION), S. 2346–2353
- [7] SÄRKKÄ, Simo: Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013 (IMS Textbooks 3)
- [8] SCHENKENDORF, René; DUTSCHK, Beate; LÜDDECKE, Katrin; GROOS, Jörn C.: Improved Railway Track Irregularities Classification by a Model Inversion Approach. In: EBALLARD, Ioana; BREGON, Anibal (Hrsg.): Proceedings of the Third European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2016 : PHME 2016, 2016, S. 62–69
- [9] Benjamin BAASCH; Michael ROTH; Jörn GROOS: In-service condition monitoring of rail tracks: On an on-board low-cost multi-sensor system for condition based maintenance of railway tracks. In: Internationales Verkehrswesen 70 (2018), Nr. 1, S. 76–79

- [10] LIU, Fei Tony; TING, Kai Ming; ZHOU, Zhi-Hua: Isolation Forest. In: 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), S. 413–422
- [11] SCHUBERT, Lucas; RAHMIG, Christian; SCHOLZ, Michael: Zentrales Echtzeit-Datenmanagement für Anwendungen im Bahnverkehr. In: El – Eisenbahningenieur (2016), Nr. 6, S. 26–30. URL <http://elib.dlr.de/103768/>
- [12] www.openstreetmap.org/copyright: (c) OpenStreetMap contributors
- [13] ABTEILUNG GEOINFORMATION: Luftbildkarte Hafengebiet Braunschweig: (c) Stadt Braunschweig (Abteilung Geoinformation)

► SUMMARY

Sensor-based anomaly detection for track condition assessment of regular trains

Mobile sensor devices allow a quasi-continuous data record which indicate some important information on the track condition. The German Aerospace Center (DLR) is therefore exploring the precise track positioning of rail cars as well as the treatment and analysis of the on-board recorded axle bearing acceleration data. For this reason, since 2015, the German Aerospace Center has operated its own multi sensor systems in the Braunschweig Hafenbahn which continuously record data during regular operation.